

磁界測定におけるホール素子の有効性

小林 勉*

磁力を電圧に変換するセンサ・GaAs ホール素子の磁束密度—出力電圧特性をヘルムホルツ・コイルで調べた結果、最小二乗法でホール出力電圧を磁束密度の値に線形に換算できることを確認した。そして身の回りにある1〔ガウス〕以上の磁性体の正確な磁束密度を簡便に測定できる方法を確立した。

I はじめに

新しい『改訂・中学校学習指導要領の展開 理科編』¹⁾には、磁界の概念を、(1)磁界は磁力線で表せること、(2)磁界の向きがわかること、(3)磁界の強さを知ることの3点に留意して指導すべきことが指摘されている。

磁力線の観察は鉄粉で行うことができ、磁界の向きも方位磁針を置いて見ることができる。しかし、磁界の強さについてはくっついた釘の数などでその強弱を判断しているのが現状である。磁界の強さを数値として表し、その強さを実感させて身近なものにしてみたいと考えた。

そんなときに磁力を電圧に変換するセンサのホール素子やホールICを使えば、弱い磁力も測定できることを知った。渡辺²⁾はホールICを検出器として磁界を直接測定できる方法を検討し、丸山³⁾もホールICを用い、定量的な測定を通して磁界を理解させる方法を試みている。しかし、それらはホール出力電圧の値を磁束密度に換算するのではなく、相対値として扱っている程度である。

そこで本研究では、まずホールセンサによって磁束密度を確実に測定できる方法を探ることにした。そして学校で手軽に磁束密度の測定ができる方法を確立し、その応用について検討した。

II 磁束密度の基準としてのヘルムホルツ・コイル

磁束密度を正確に求める装置の1つにヘルムホルツ・コイルがある。本研究では、磁束密度の較正をヘルムホルツ・コイルによって行うことにした。ヘルムホルツ・コイルは、図1のように2組の円形コイルの中心軸を一致させ、さらにコイルの間隔がコイル半径 r 〔m〕と等しくなるように配置した装置である。このコイルによって囲まれた空間では磁束密度はほぼ一様な磁束密度の分布を示すことが知られている。⁴⁾

いま、真空の透磁率を μ_0 ($= 4\pi \times 10^{-7}$ 〔Wb/A・m〕)、コイルの巻数を N 〔1/m〕、コイルに流れる電流を I 〔A〕とすると、中心軸上の磁束密度 B は次式で求めることができる。⁵⁾

$$\begin{aligned} B \text{〔T〕} &= \mu_0 (4/5)^{3/2} \cdot N I / r \\ &= 8.997 \times 10^{-7} \times N I / r \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

* 理科長期研修員（東蒲原地区理科教育センター、津川町立津川小学校）

磁束密度の単位は、MKSA 単位系ではテスラ〔T〕，または〔Wb / m²〕である。一般にはCGS 単位系のガウス〔gauss または G〕が慣用として使われている。以下，慣用にしたいガウスを用いることにする。それらの間の関係は次のとおりである。

$$1 \text{ [T]} = 1 \text{ [Wb / m}^2\text{]} = 10^4 \text{ [gauss]} \cdots \cdots (2)$$

センターにある前住製ヘルムホルツ・コイル（規格 0.8〔A〕，100〔G〕）は N，r が知られていないが，磁束密度 B について，

$$B \text{ [gauss]} = 125 \cdot I \text{ [A]} \cdots \cdots (3)$$

だけがわかっている。コイルの電流による発熱のため，ヘルムホルツ・コイルを 100～200〔gauss〕以下の磁束密度の較正に使用し，それ以上の磁束密度についてはこのコイルで較正した島津製のガウスメータ（磁束計）を使用した。

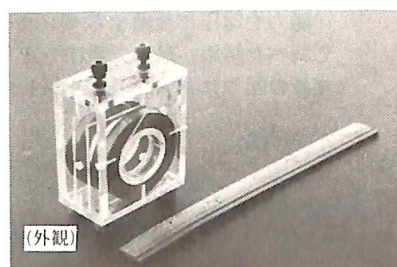
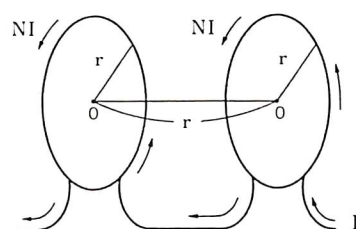


図1 ヘルムホルツ・コイル

Ⅲ 市販のガウスメータによる磁束密度

市販の島津製ガウスメータ（TYPE GK-3）と内田製ガウスメータ（TYPE KG-3）の2機種を使っていろいろな磁石の磁束密度を測定し，比較してみた。両機種とも4段階の計測レンジ（0～0.03，0～0.1，0～0.3，0～1.0〔Wb / m²〕）があり，レンジを切り替えるごとに0点調整をしなければならない。2つのガウスメータで測定した結果，磁束密度の値に違いがあった。内田製ガウスメータは安定性が悪かったので，島津製のガウスメータで測定することにした。なお，両ガウスメータの最小磁束密度は，目測で1〔gauss〕程度まで読みとることができる。

次に島津製ガウスメータが正確に動作しているかどうかを前住製ヘルムホルツ・コイルで調べるため，コイルに電流を流し，その磁界にガウスメータのプロープ（探針）を差し込んで磁束密度を測定した。

その値と，(3)式に電流値を代入して算出した磁束密度との差を比較したところ，おおむね信頼できる結果が出た。しかし，同じ磁束密度に対してレンジを切り替えると，かなり違った値になる領域があることもわかった。

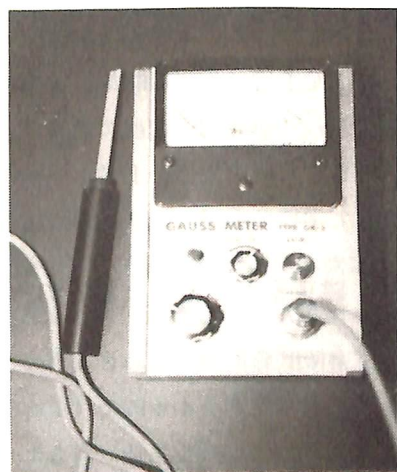


図2 ガウスメータ

Ⅳ ホール素子について

1 ホール素子の動作原理

ホール素子は磁気を電圧で検出するセンサである。1879年，E. H. ホールによって発見されたホール効果を応用してつくられた。図3に示すように，物質中を電流 I_c が流れ，正の荷電粒子が右方向へ移動しているとすると。この物質を上向きの磁界 B の中に置くと，正の荷電粒子は磁界から作用する力（ロー

レンツ力)を受けて手前Mの方向へ動き、物質のM側は後方N側に比べて電位が高くなる。この現象をホール効果という。これによる電位差をホール電圧といい、その大きさ V_H [V] は、

$$V_H \text{ [V]} = K \cdot I_c \cdot B$$

で表される。ここで K は積感度と呼ばれ、ホールセンサの感度を表す。この K の値が大きいほど素子の出力特性が優れている。ホール電圧 V_H は磁界の強さ B に比例して大きくなるので、この物質を磁気センサとして利用できる。

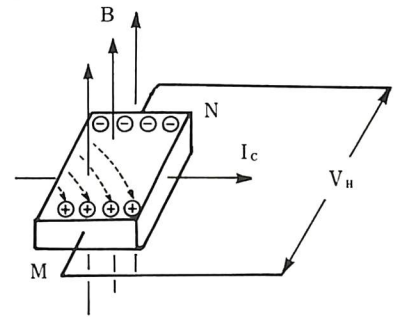


図3 ホール効果

2 ホール素子の形状、種類とその特徴⁶⁾

ホール素子の形上は図4に示したように小型で、パッケージの大きさは3～5 [mm]、厚さは2 [mm]程度である。パッケージの中のホール素子の大きさは縦横1 [mm]で、中央に位置している。

(1) 単体としてのホール素子

(A) InSb (インジウム・アンチモン) 系ホールセンサ

………定電圧動作方式

- ① オフセット電圧(無磁界での不平衡電圧)の安定性がよい。
低磁界でもS/N比(雑音に対する正しい信号の割合)のよい測定ができる。

- ② 出力電圧の温度特性が悪い(定電圧動作にすることにより改善できる)。

- ③ 周波数特性があまりよくない(数 kHz～数十 kHz まで)。

(B) GaAs (ガリウム・ヒ素) 系ホールセンサ

………定電流動作方式

- ① ホール電圧の温度依存性が小さい(最大の長所)。
- ② 磁界に対するホール電圧の直線性が良い。
- ③ 積感度がInSbホールセンサに比べて小さい(大半のInSbホールセンサには集磁鋼が取り付けられており、見かけ上出力電圧が多いように見える)。
- ④ 周波数特性が良く、InSbホールセンサより数十倍の帯域をもっている。

なお、現在ホールセンサはGaAsが主流になってきている。それで本研究では、高精度測定に適した定電流動作でうまく機能するGaAsホール素子のTHS 103A(東芝製)をとりあげることにした。

(2) 複合ホール素子

例として、これまでの研究に用いられてきたシリコン・ホールICがあげられる。シリコンより電子移動度の大きいGaAs、InSbなどの化合物半導体でつくった単体ホール素子と比べると、ホールICの方が出力電圧が小さくて不利な面がある。しかし、シリコン・ホールICはバイポーラ型(主にトランジスタで構成されたもの)IC製作の工程で増幅回路や温度補償回路をチップ上に作り込むことで、高性能なセンサになっている。

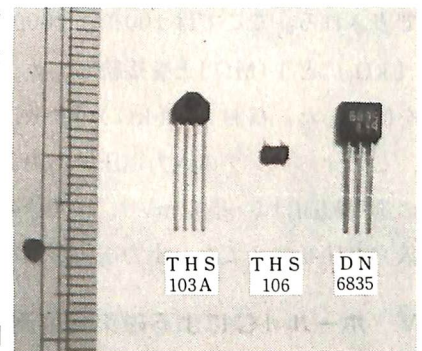


図4 ホール素子の形状

3 オペアンプ(演算増幅器)の作成

オペアンプとは、演算あるいは増幅動作を外づけ回路によって、簡単に実現できる重要な IC である。ホール電圧が小さい場合の測定にはどうしてもこのオペアンプの助けを得なければならない。

図5は負帰還反転増幅器の回路図で反転入力端子(−)と非反転入力端子(+)に加えられた入力電圧が増幅されて出力する増幅器である。

その増幅率 G は、入力電圧を V_1 、出力電圧を V_2 とすると、

$$G = V_2 / V_1 = (R_1 + R_2) / R_1 \cdots \cdots (4)$$

で表される。ここでは100倍と1000倍の増幅率を得るため、 R_1 には1[k Ω]、 R_2 にはそれぞれ100[k Ω]と1[M Ω]とを接続し、オペアンプには汎用型の μA 741型を、電源には006P乾電池9[V]を使用した。なお、10[k Ω]可変抵抗は0点調整のために接続した。

このオペアンプの入力電圧—出力電圧特性を調べた結果、100倍の増幅レンジを使うときの入力電圧の適用範囲は0~50[mV]、1000倍のレンジの入力電圧適用範囲は0~5[mV]と決めた。それ以上の入力電圧を加えても、出力電圧が飽和して正確な測定値が得られないからである。

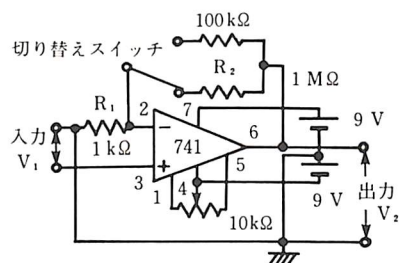


図5 オペアンプ回路

V ホール IC による磁束密度測定の有効性

1 ホール IC のホール電圧検出回路

今まで使われてきたホール IC の DN6835 (松下工業製) を用い、図6に示す検出回路で有効性を検討した。その回路には磁気が微小なときはホール IC が地磁気をも感知してしまうので1[k Ω]可変抵抗を入れ、それを調整することで地磁気の影響による出力がなくなるように0点調整をした。出力端子にはデジタルメータを接続し、電源は単一乾電池4個の6[V]を使った。

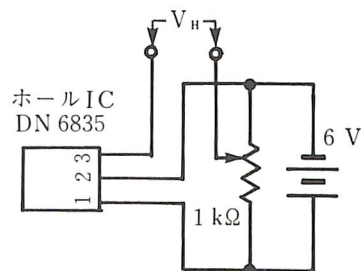


図6 ホール IC による
ホール電圧検出回路

2 ヘルムホルツ・コイルを使った磁束密度の較正

ホール IC は規格上 ± 350 [gauss]まで動作することになっているが、磁束密度に換算できる測定値の範囲を前住製ヘルムホルツ・コイルで調べた。そして、直線性のよい部分 ($V_H = 0.051 \sim 0.245$ V) に対し最小二乗法で回帰式を求めた結果、次のような換算式を得た。

$$B \text{ [gauss]} = 321 \times 10^{-3} \cdot V_H \text{ [V]} - 4.768 \cdots \cdots (5)$$

測定可能な磁束密度の値は、(5)式から11.6~73.9 [gauss]という狭い範囲に限られることがわかる(これは最新のホール IC - DN シリーズでも同じであった⁷⁾)。また、低磁界では不平衡電圧の0点調整が定まらず不安定であったり、磁界測定後に元の数値にもどりにくいという弱点があった。このような特性はこれまでの研究者によって明確に指摘されてこなかった点である。したがって、非線形な特性をもった素子(ホール IC や InSb ホール素子)は磁束密度の有無の検出用として用いられているものであって、ホール電圧から磁束密度を求める素子としては適していないといえる。

VI GaAsホール素子による磁束密度測定の有効性

磁束密度とホール電圧が比例するホール素子 THS 103A の有効性を検討するため、図 7 のホール電圧検出回路を作った。

資料⁸⁾によると、制御電流 $I_c = 5$ [mA]、磁束密度 $B = 1$ [kG]、周囲温度 $T_a = 25^\circ\text{C}$ のとき、ホール電圧 V_H は $50 \sim 120$ [mV] である。出力用の抵抗 R_L は 10 [k Ω] 以上ないと大きなホール電圧が得られないので、実験のときは 20 [k Ω] や 100 [k Ω] の抵抗をつけた。入力端子には電源装置から定電流の 5 [mA] を供給した。出力端子にはデジタルメータを接続し、ホール電圧検出用とした。

実験では $R_L = 20$ [k Ω] のときの不平衡電圧は $V_{H0} = -1.0$ [mV]、 100 [k Ω] のときは $V_{H0} = -0.2$ [mV] だった。 1 [kG] の磁界でホール素子による磁束密度を確認したところ、ホール電圧実測値 V_{HM} は $R_L = 20$ [k Ω] のときが 80.0 [mV] で、 100 [k Ω] のときが 86.3 [mV] であった。これらの値は資料の数値と一致しているので、素子が正しく動作していることがわかる。ホール電圧 V_H は、不平衡電圧 V_{H0} とホール電圧実測値 V_{HM} から、次式で求められる。

$$V_H = V_{HM} - V_{H0} \quad \dots\dots\dots(7)$$

なお、不平衡電圧の絶対値の大きさが 0 に近い方が使いやすいので、 $R_L = 100$ [k Ω] の方を実験に使っていくことにした。さらに、THS 103A は不平衡点が印加した前後で正確に同じ値をとるという利点があることもわかった。

次にヘルムホルツ・コイルに電流を流し続けていると、温度が上昇してくることがわかったので、電流を 10 分間流し続けてホール電圧の温度変化を測定した (図 8)。その結果、ホール I_C と比べて THS 103A は熱に左右されず、簡易磁束計として十分使えることが確認できた。そして、(3) 式から得られるヘルムホルツ・コイルの磁束密度とホール電圧を比べて図 9 の直線的な特性を得た。そこでホール電圧を磁束密度に直すために回帰式を求めた結果、次式を得た。

$$B \text{ [gauss]} = 10.98 \times V_H \text{ [mV]} - 0.574 \quad \dots\dots\dots(8)$$

また、THS 103A でどれだけ微弱な磁界の磁束密度を測定できるか調べてみたところ、オペアンプを使わないときは 5 [gauss] 程度まで、オペアンプを使うと 0.5 [gauss] 程度まで測定できることがわかった。それ以下については地磁気 (およそ 0.3 [gauss]) の影響やオペアンプによる温度ドリフト (変動)、室内におけるわずかなノイズなどのためデジタルメータの値が安定せず、測定できなかった。

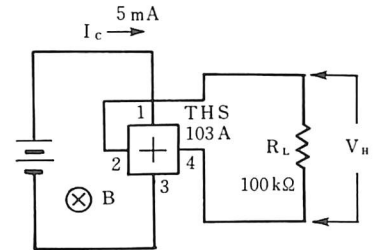


図 7 THS 103A による
ホール電圧検出回路

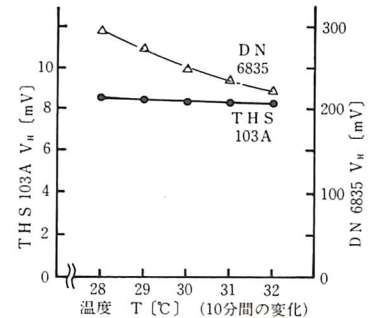


図 8 ヘルムホルツ・コイルの
温度変化とホール電圧

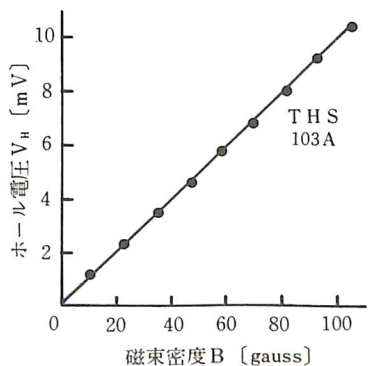


図 9 ホール電圧と磁束密度

また、THS 103Aは東芝のカタログ⁸⁾の特性直線(図10; 制御電流 $I_C = 1$ [mA] の場合) から、制御電流を5 [mA] で使用するときにはホール電圧を5倍したグラフを作って用いれば、そのグラフにしたがって磁束密度を知ることができる。以上の結果から THS103A では1 ~ 14,000 [gauss] という広範囲の磁束密度を線形に精度よく測定可能であることがわかった。

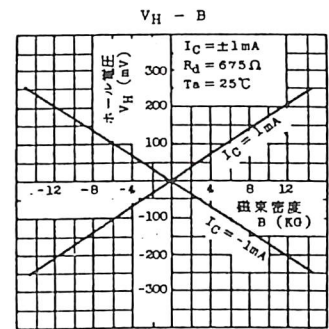


図10 THS 103A の特性直線

VII GaAsホール素子を使った磁界測定

1 いろいろな磁石の磁界測定

次に、このホール素子 THS103A で身の回りにある磁石の磁界測定を試みた。磁石の場合、磁束密度が高いのはN、Sの磁極であるが、もっとも磁束密度が大きくなるのは磁極の中央ではなく、角の部分だった。また、磁石の経年変化や欠損の仕方によっても磁束密度は異なり、同じ磁石でも測定位置によって大きな違いがある。

そこで THS103A の測定値と、島津製ガウスメータで測定した値と比較し誤差を調べた。その結果が表1である。その際、磁束密度の一番高い数値を磁石の磁束密度とした。THS103Aの制御電流 I_C は5 [mA]、抵抗 R_L は100 [kΩ]を使用した。

表1 THS 103Aを使った磁石の磁束密度(磁力の一番強い部分の磁束密度)

磁石の種類	THS 103A	ガウスメータ	誤差 [%]	磁石の種類	THS 103A	ガウスメータ	誤差 [%]
ネオジウム磁石	2,904	3,000	- 3	ドーナツ型フェライト磁石	372	400	- 7
標準磁石 (1000 G)	949	1,000	- 5	円形フェライト磁石	356	350	2
アルニコ磁石 (角)	928	900	3	四角形平磁石	393	440	-11
U型アルニコ磁石	693	750	- 8	丸型棒磁石	196	200	- 2
U型磁石	120	100	20	平型棒磁石	231	220	5
ビップエレキバン (800G)	468	460	2	方位磁針 (長さ10cm)	27	35	-23
ビップエレキバン (1300G)	930	1,000	- 7	方位磁針 (直径1.8 cm)	7	7	0

(単位 THS 103A : 換算値 [gauss], ガウスメータ : [gauss])

表1からわかるように、ガウスメータの測定値に対する THS103Aの誤差はおよそ±20%以内である。これは前述したように、磁束密度は測定位置により大きく値が異なることから考えて容認できる範囲であるといえる。このように THS 103A はデジタルメータで詳細な測定値が得られ、ガウスメータにはほぼ近い数値を得ることができる。

2 磁極からの距離と磁界の強さ

丸棒磁石のN極からホール素子を1 [cm]、2 [cm]、3 [cm]……と離していったときの磁界の強さの変化に対するホール電圧を測定した。

その結果は図11のようになった。磁極付近では磁力線が放射状に出ているので、磁極からの距離を r とするとき磁束密度は $1/r^2$ に比例する。図11のグラフを見ると、ホール電圧 V_H は $1/r^2$ にほぼ比例しているといえることから、THS103Aは磁束密度を正確に測定していると考えられる。

3 直線電流による磁界の強さ—エナメル線の周囲にできる磁界

図12の装置で、エナメル線（長さ50[cm]、直径0.65[mm]）に流れる電流によって生じる磁束密度をホール素子で測定した。

ホール素子は素子の面に垂直に磁力線が通過するようにしてエナメル線に触れる程度に固定し、エナメル線には電源装置と可変抵抗器を接続した。出力端子にはオペアンプ（1000倍）を接続した。

次に、電源装置で電流を少しずつ変えて流し、エナメル線の周囲にできる磁界をホール電圧で測定した。

図13が測定結果である。電流1[A]以下の場合には磁束密度が小さいため、ホール素子の測定値には振れ幅が生じている。この振れ幅は、THS103Aとオペアンプの温度ドリフトや地磁気などが合わされて起きる。しかしながらTHS103Aのホール電圧はほぼ直線性のあるグラフを示している。その傾き $a (= V_H / I)$ は、およそ 0.1×10^{-3} である。ガウスメータで測定したら磁束密度があまりにも微小なため作動しなかった。ホール電圧から換算すると $0.5 \sim 1.8$ [gauss] だった。

この実験は地磁気の影響をさけるためにも、20~30[A]の大電流があれば磁束密度の変化がよくわかる。直線電流でそのような大電流を得たいときは、エナメル線を縦15[cm]、横30[cm]くらいで大きさを10回巻き、2[A]の電流を流せばよい。そうすれば、各辺でその10倍の20[A]の電流を得ることができる（または大電流電源装置があればそれを用いてもよい）。

VIII GaAsホール素子簡易磁束計の工夫

1 プローブを長くする

磁石や直線電流を測定するときに、さまざまな位置にホール素子を移動できるととても測定しやすい。そこで自由にホール素子を動かせるように、素子の入力、出力端子から出るリード線をそれぞれ30[cm]ほど長くした。さらに図14のように、素子を固定したり、支持したりするために幅5[mm]、長さ7[cm]、厚さ1[mm]の板状木片を取りつけた。

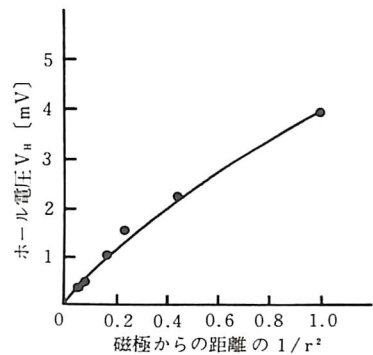


図11 磁極からの距離とホール電圧

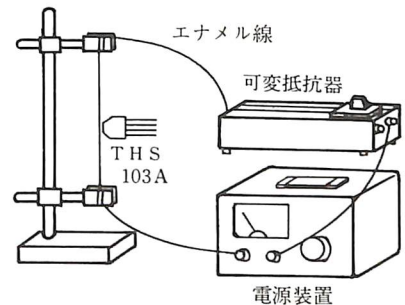


図12 エナメル線のまわりにできる磁界実験装置

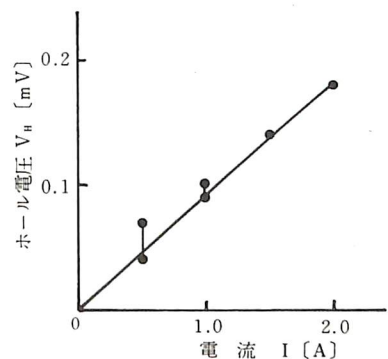


図13 エナメル線のまわりの磁束密度

2 乾電池1個で定電流電源を得る

電源としての乾電池は電流を制御できないが、GaAs ホール素子の定電流動作には適していると考えられる。THS103Aの内部抵抗 R_d を測定したら $R_d = 655 \text{ [k}\Omega\text{]}$ だった。新しい乾電池(電圧 1.5 [V])を入力端子に接続すれば計算でおよそ 2.3 [mA] の電流が流れるはずである。

実際に新しい乾電池(単一)を素子に接続し、THS103Aを動作させたところ、不平衡電圧 V_{HO} は -0.2 [mA] で安定し、乾電池1個から流れる電流の大きさは、 2.2 [mA] だった。10分以上時間が経過しても電流値に変化はなかった。これによって手軽に磁束密度を測定できることが確認できた。

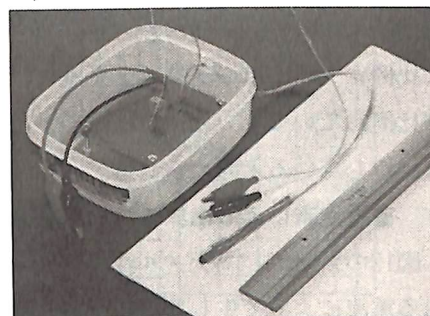


図14 THS 103A簡易磁束計

IX おわりに

私自身、これまで磁界をただ強弱という枠でしかとらえることができなかったが、身の回りのいろいろな磁場を測定することによって、磁石がどのくらいの磁束密度をもっているのかがわかった。また、他の磁石とどれくらいの差があるのか考えられるようにもなり、今まで知らなかった磁界の強さを実に身近なものに感じた。それは相対値でなく、数値で磁界の強さを表すことができたからである。

今回自作したTHS103A簡易磁束計は、 1 [gauss] という微小な磁界から、ネオジム磁石などのたいへん強い磁界まで、レンジの切り替えなしに測定できる優れた特性があるので、今後も大いに活用していきたい。

参考・引用文献

- 1) 小暮陽三ほか：改訂・中学校学習指導要領の展開 理科編，明治図書(1989)，P.83
- 2) 渡辺 寛：新潟県立教育センター研究報告 第93号(1987)，P.1～4
- 3) 丸山 進：学校図書教材研究 理科 中学校編 No.87(1987)，P.9～12
- 4) 物理教材研究会：物理計測システム実用設計，CQ出版社(1990)，P.264
- 5) 霜田光一・近角聡信編：大学演習 電磁気学，裳華房(1964)，P.106
- 6) 松井邦彦：センサ応用回路の設計・製作，CQ出版社(1990)，P.119
- 7) 松下電子工業：半導体ホールICシリーズ商品カタログ(1990.9)
- 8) 東芝：GaAs ホールセンサ半導体技術資料，初版(1986)，P.15，P.32～33